

り、粘性摩擦係数とクーロン摩擦を求めて、アタチュエータの摩擦モデルを同定することになる。

リソルト1に開いては Fig. 4 からわかるように、重力を影響は受けず、摩擦力だけを考慮しなければならない。従って、同様の等角速度試験を行って、そのときの入力トルクの大きさを測定して摩擦モデルを同定するだけでよい。

以上、各リンクにおける等角速度試験の結果を Fig. 5 に示す。そして求められた摩擦モデルを Fig. 6 に示す。

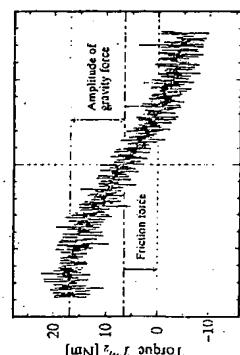
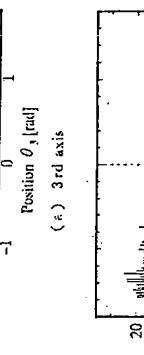
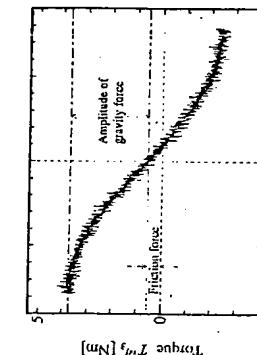


Fig. 5 Experimental results of constant angular velocity test

4.3 摩擦項の同定

慣性項の同定には、Fig. 3 に示したトルクオフザーベータの摩擦モデルを同定することになる。

リソルト1に開いては Fig. 4 からわかるように、重力を考慮するに際しては、(17) 式のように、(18) 式のようにも表すことができる。

$$= (J - J_{\text{fl}}) \dot{\omega} + T_{\text{diss}} \quad (17)$$

これより $\dot{\omega} = 0$ のとき、慣性のノミナル値と其値との間に差があれば、加速度が生じるときに、すなわち過渡応答時にトルクオフザーベータの出力にその影響が現れる。

従って、アタチュエータに対してステップ状の速度指令を与える、そのときのトルクオフザーベータの出力を測定し、定常時の出力と比較することにより慣性の推定が可能となる。¹³⁾

これをロボットマニピュレータの慣性項の同定に用い、

$$\dot{\omega}_{\text{fl}} + r_g g s_{\text{fl}} - D_{\text{fl}} \omega_{\text{fl}} \text{sgn } \omega_{\text{fl}} = (J_{\text{fl}} - J_{\text{fl}}) \dot{\omega}_{\text{fl}} \quad (18)$$

すなわち、ステップ状の速度指令を与えたときのトルクオフザーベータの出力と、慣性が無いたきの出力を比較することによって慣性を推定することになる。この場合、実際の外力は重力と慣性からなる。従って、先述の等角速度試験で求めたトルクオフザーベータを用いて重力と摩擦力を推定することができ、これを (14) 式と (18) 式を用いて表すと (19) 式と (20) 式のようになる。

$$\dot{\omega}_{\text{fl}} + r_g g s_{\text{fl}} - D_{\text{fl}} \omega_{\text{fl}} \text{sgn } \omega_{\text{fl}} = (J_{\text{fl}} - J_{\text{fl}}) \dot{\omega}_{\text{fl}} \quad (19)$$

$$= (J_{\text{fl}} - (J_{\text{fl}} + J_{\text{fl}} + 2 r_g l_{\text{fl}} c_{\text{fl}})) \dot{\omega}_{\text{fl}} \quad (20)$$

(19) 式よりリンク3に対して速度ステップ応答試験を行うと、 $\theta_3 = 0$ としてリンク2に対して同様の試験を行うと、(20) 式より $J_{\text{fl}} + 2 r_g l_{\text{fl}}$ が求められる。 J_{fl} と θ_3 は既知であるため、 J_{fl} を求めることができる。

たなは、(17) 式をそのまま用いる。従って、(17) 式は (21) 式のようになる。

$$\dot{\omega}_{\text{fl}} = (J_{\text{fl}} - (J_{\text{fl}} + J_{\text{fl}} + 2 r_g l_{\text{fl}} + r_g l_{\text{fl}} s_{\text{fl}} + r_g l_{\text{fl}} c_{\text{fl}})) \dot{\omega}_{\text{fl}} \quad (21)$$

(21) 式から、このリンク1に関しては求めるべき慣性項が J_{fl} と J_{fl} と 3種類存在する。そこで、ロボットマニピュレータの慣性を表えることによって速度ステップ応答試験を行うと求める慣性は J_{fl} だけになる。次に、 $\theta_2 = \theta_1 = \pi/2$ として同様の試験を行うと、 $J_{\text{fl}} + J_{\text{fl}}$ が求められる。 J_{fl} は既知であるから、 J_{fl} が求められる。最後に、 $\theta_1 = 0, \theta_2 = \pi/2$ として同様の試験を行うと、 $J_{\text{fl}} + J_{\text{fl}}$ を求めることができる。先ほどと同様に J_{fl} は既知であるため、 J_{fl} を求めることができる。

次に、本論文で行ったロボットマニピュレータの慣性項の回路試験の結果について述べる。Fig. 7 ではリンク2とリンク3に開く速度ステップ応答試験の結果を示す。ここで、 θ_{fl} は動力学モデルとの誤差を表し、この誤差はかなり小さいことがわかる。このようなな速度ステップ応答試験をいろいろな慣性のミル値で行って、

統計をとると Fig. 8 のようになる。リンク1についても同様の結果が得られる。これらの実験結果からロボットマニピュレータの慣性項を求めることがあることになる。

る場合について考える。マニピュレータの場合、本実験では特にリンク2とリンク3の場合、重力の影響により一定速度の正常状態であっても外力の値が変化してしまい、慣性の推定が困難になる。そこで (17) 式を (18) 式のように変形する。

5. カセシサを用いた位置と力のハイブリッド制御

固定実験で得られたパラメータを用いてマニピュレータの逆運動方程式を解くことにより、重力などの外力を推定することができる。これより、(13) 式の反力 T_{flac} を推定する反力推定機能部を構成すると Fig. 9 のようになる。Fig. 9 からわかるように、逆運動方程式を解くことにより摩擦力と重力等の外力を算出し、トルクオフザーベートマニピュレータを用いて外力 T_{flac} から差し引くことにより、反力 T_{flac} を推定する構造になっている。ただし、トルクオフザーベートマニピュレータの出力と、正弦波シグナルでの非線形項を用いて推定することはできな

い、そのため、そのような非線形項は逆運動方程式を解いて

$$\dot{\omega}_{\text{fl}} + r_g g s_{\text{fl}} - D_{\text{fl}} \omega_{\text{fl}} \text{sgn } \omega_{\text{fl}} = (J_{\text{fl}} - J_{\text{fl}}) \dot{\omega}_{\text{fl}} \quad (18)$$

すなわち、そのときのトルクオフザーベータの出力を測定し、そのときのトルクオフザーベータと非線形項は逆運動方程式を解いて

$$\dot{\omega}_{\text{fl}} + r_g g s_{\text{fl}} - D_{\text{fl}} \omega_{\text{fl}} \text{sgn } \omega_{\text{fl}} = (J_{\text{fl}} - (J_{\text{fl}} + J_{\text{fl}} + 2 r_g l_{\text{fl}} c_{\text{fl}})) \dot{\omega}_{\text{fl}} \quad (19)$$

(19) 式よりリンク3に対して速度ステップ応答試験を行うと、 $\theta_3 = 0$ としてリンク2に対して同様の試験を行うと、(20) 式より $J_{\text{fl}} + 2 r_g l_{\text{fl}}$ が求められる。 J_{fl} と θ_3 と θ_1 は既知であるため、 J_{fl} を求めることができる。

たなは、(17) 式をそのまま用いる。従って、(17) 式は (21) 式のようになる。

$$\dot{\omega}_{\text{fl}} = (J_{\text{fl}} - (J_{\text{fl}} + J_{\text{fl}} + 2 r_g l_{\text{fl}} + r_g l_{\text{fl}} s_{\text{fl}} + r_g l_{\text{fl}} c_{\text{fl}})) \dot{\omega}_{\text{fl}} \quad (21)$$

(21) 式から、このリンク1に関しては求めるべき慣性項が J_{fl} と J_{fl} と 3種類存在する。そこで、ロボットマニピュレータの慣性を表すことによって速度

ステップ応答試験を行うと求める慣性は J_{fl} だけにな

る。次に、 $\theta_2 = \theta_1 = \pi/2$ として同様の試験を行うと、 $J_{\text{fl}} + J_{\text{fl}}$ が求められる。 J_{fl} は既知であるから、 J_{fl} が求められる。最後に、 $\theta_1 = 0, \theta_2 = \pi/2$ として同様の試験を行うと、 $J_{\text{fl}} + J_{\text{fl}}$ を求めることができる。先ほどと同様に J_{fl} は既知であるため、 J_{fl} を求めることができる。

次に、本論文で行ったロボットマニピュレータの慣性

項の回路試験の結果について述べる。Fig. 7 ではリンク

2とリンク3に開く速度ステップ応答試験の結果を示す。

ここで、 θ_{fl} は動力学モデルとの誤差を表し、こ

の誤差はかなり小さいことがわかる。このようなな速度

ステップ応答試験をいろいろな慣性のミル値で行って、

統計をとると Fig. 8 のようになる。リンク1についても

同様の結果が得られる。これらの実験結果からロボ

ットマニピュレータの慣性項を求めることがあることになる。

$$\dot{\omega}_{\text{fl}} = (J'_{\text{fl}} - J_{\text{fl}}) \dot{\omega}_{\text{fl}} \quad (22)$$

ただし、 J' はロボットマニピュレータの配置行列を表す。ななわち

$$\dot{\omega}_{\text{fl}} + r_g g s_{\text{fl}} + D_{\text{fl}} \omega_{\text{fl}} \text{sgn } \omega_{\text{fl}} = (J'_{\text{fl}} - J_{\text{fl}}) \dot{\omega}_{\text{fl}} \quad (23)$$

この反力推定機能部を多関節ロボットマニピュレータの各関節に設置する。入力値として H^{a} 加速度コントローラのトルク指令 T^{a} と位置 θ を用いる。

この反力推定機能部を各関節節距原で求められる。ここで (22) 式

を用いることにより、各関節で求められた反力の推定値から直角座標で表した以力として、等しく学値される。

$$\hat{T}_{\text{flac}} = (J')^T \cdot T_{\text{flac}} \quad (24)$$

ただし、 J' はロボットマニピュレータの配置行列を表す。

たなは、 J_{fl} を求めることができる。

たなは、(17) 式をそのまま用いる。

従って、(17) 式は (21) 式のようになる。

$$\dot{\omega}_{\text{fl}} = (J_{\text{fl}} - (J_{\text{fl}} + J_{\text{fl}} + 2 r_g l_{\text{fl}} c_{\text{fl}})) \dot{\omega}_{\text{fl}} \quad (21)$$

(21) 式から、このリンク1に関しては求めるべき慣性

項が J_{fl} と J_{fl} と 3種類存在する。そこで、ロボットマニピュレータの慣性を表すことによって速度

ステップ応答試験を行うと求める慣性は J_{fl} だけにな

る。次に、 $\theta_2 = \theta_1 = \pi/2$ として同様の試験を行うと、 $J_{\text{fl}} + J_{\text{fl}}$ が求められる。 J_{fl} は既知であるから、 J_{fl} が求められる。最後に、 $\theta_1 = 0, \theta_2 = \pi/2$ として同様の試験を行うと、 $J_{\text{fl}} + J_{\text{fl}}$ を求めることができる。先ほどと同様に J_{fl} は既知であるため、 J_{fl} を求めることができる。

次に、本論文で行ったロボットマニピュレータの慣性

項の回路試験の結果について述べる。Fig. 7 ではリンク

2とリンク3に開く速度ステップ応答試験の結果を示す。

ここで、 θ_{fl} は動力学モデルとの誤差を表し、こ

の誤差はかなり小さいことがわかる。このようなな速度

ステップ応答試験をいろいろな慣性のミル値で行って、

統計をとると Fig. 8 のようになる。リンク1についても

同様の結果が得られる。これらの実験結果からロボ

ットマニピュレータの慣性項を求めることがあることになる。

$$\dot{\omega}_{\text{fl}} = (J'_{\text{fl}} - J_{\text{fl}}) \dot{\omega}_{\text{fl}} \quad (22)$$

ただし、 J' はロボットマニピュレータの配置行列を表す。

たなは、(17) 式をそのまま用いる。

従って、(17) 式は (21) 式のようになる。

$$\dot{\omega}_{\text{fl}} = (J_{\text{fl}} - (J_{\text{fl}} + J_{\text{fl}} + 2 r_g l_{\text{fl}} c_{\text{fl}})) \dot{\omega}_{\text{fl}} \quad (21)$$

(21) 式から、このリンク1に関しては求めるべき慣性

項が J_{fl} と J_{fl} と 3種類存在する。そこで、ロボットマニピュレータの慣性を表すことによって速度

ステップ応答試験を行うと求める慣性は J_{fl} だけにな

る。次に、 $\theta_2 = \theta_1 = \pi/2$ として同様の試験を行うと、 $J_{\text{fl}} + J_{\text{fl}}$ が求められる。 J_{fl} は既知であるから、 J_{fl} が求められる。最後に、 $\theta_1 = 0, \theta_2 = \pi/2$ として同様の試験を行うと、 $J_{\text{fl}} + J_{\text{fl}}$ を求めることができる。先ほどと同様に J_{fl} は既知であるため、 J_{fl} を求めることができる。

次に、本論文で行ったロボットマニピュレータの慣性

項の回路試験の結果について述べる。Fig. 7 ではリンク

2とリンク3に開く速度ステップ応答試験の結果を示す。

ここで、 θ_{fl} は動力学モデルとの誤差を表し、こ

の誤差はかなり小さいことがわかる。このようなな速度

ステップ応答試験をいろいろな慣性のミル値で行って、

統計をとると Fig. 8 のようになる。リンク1についても

同様の結果が得られる。これらの実験結果からロボ

ットマニピュレータの慣性項を求めることがあることになる。

$$\dot{\omega}_{\text{fl}} = (J'_{\text{fl}} - J_{\text{fl}}) \dot{\omega}_{\text{fl}} \quad (22)$$

ただし、 J' はロボットマニピュレータの配置行列を表す。

たなは、(17) 式をそのまま用いる。

従って、(17) 式は (21) 式のようになる。

$$\dot{\omega}_{\text{fl}} = (J_{\text{fl}} - (J_{\text{fl}} + J_{\text{fl}} + 2 r_g l_{\text{fl}} c_{\text{fl}})) \dot{\omega}_{\text{fl}} \quad (21)$$

(21) 式から、このリンク1に関しては求めるべき慣性

項が J_{fl} と J_{fl} と 3種類存在する。そこで、ロボットマニピュレータの慣性を表すことによって速度

ステップ応答試験を行うと求める慣性は J_{fl} だけにな

る。次に、 $\theta_2 = \theta_1 = \pi/2$ として同様の試験を行うと、 $J_{\text{fl}} + J_{\text{fl}}$ が求められる。 J_{fl} は既知であるから、 J_{fl} が求められる。最後に、 $\theta_1 = 0, \theta_2 = \pi/2$ として同様の試験を行うと、 $J_{\text{fl}} + J_{\text{fl}}$ を求めることができる。先ほどと同様に J_{fl} は既知であるため、 J_{fl} を求めることができる。

次に、本論文で行ったロボットマニピュレータの慣性

項の回路試験の結果について述べる。Fig. 7 ではリンク

2とリンク3に開く速度ステップ応答試験の結果を示す。

ここで、 θ_{fl} は動力学モデルとの誤差を表し、こ

の誤差はかなり小さいことがわかる。このようなな速度

ステップ応答試験をいろいろな慣性のミル値で行って、

統計をとると Fig. 8 のようになる。リンク1についても

同様の結果が得られる。これらの実験結果からロボ

ットマニピュレータの慣性項を求めることがあることになる。

$$\dot{\omega}_{\text{fl}} = (J'_{\text{fl}} - J_{\text{fl}}) \dot{\omega}_{\text{fl}} \quad (22)$$

ただし、 J' はロボットマニピュレータの配置行列を表す。

たなは、(17) 式をそのまま用いる。

従って、(17) 式は (21) 式のようになる。

$$\dot{\omega}_{\text{fl}} = (J_{\text{fl}} - (J_{\text{fl}} + J_{\text{fl}} + 2 r_g l_{\text{fl}} c_{\text{fl}})) \dot{\omega}_{\text{fl}} \quad (21)$$

(21) 式から、このリンク1に関しては求めるべき慣性

項が J_{fl} と J_{fl} と 3種類存在する。そこで、ロボットマニピュレータの慣性を表すことによって速度

ステップ応答試験を行うと求める慣性は J_{fl} だけにな

る。次に、 $\theta_2 = \theta_1 = \pi/2$ として同様の試験を行うと、 $J_{\text{fl}} + J_{\text{fl}}$ が求められる。 J_{fl} は既知であるから、 J_{fl} が求められる。最後に、 $\theta_1 = 0, \theta_2 = \pi/2$ として同様の試験を行うと、 $J_{\text{fl}} + J_{\text{fl}}$ を求めることができる。先ほどと同様に J_{fl} は既知であるため、 J_{fl} を求めることができる。

次に、本論文で行ったロボットマニピュレータの慣性

項の回路試験の結果について述べる。Fig. 7 ではリンク

2とリンク3に開く速度ステップ応答試験の結果を示す。

ここで、 θ_{fl} は動力学モデルとの誤差を表し、こ

の誤差はかなり小さいことがわかる。このようなな速度

ステップ応答試験をいろいろな慣性のミル値で行って、

統計をとると Fig. 8 のようになる。リンク1についても

同様の結果が得られる。これらの実験結果からロボ

ットマニピュレータの慣性項を求めることがあることになる。

$$\dot{\omega}_{\text{fl}} = (J'_{\text{fl}} - J_{\text{fl}}) \dot{\omega}_{\text{fl}} \quad (22)$$

ただし、 J' はロボットマニピュレータの配置行列を表す。

たなは、(17) 式をそのまま用いる。

従って、(17) 式は (21) 式のようになる。

$$\dot{\omega}_{\text{fl}} = (J_{\text{fl}} - (J_{\text{fl}} + J_{\text{fl}} + 2 r_g l_{\text{fl}} c_{\text{fl}})) \dot{\omega}_{\text{fl}} \quad (21)$$

(21) 式から、このリンク1に関しては求めるべき慣性

項が J_{fl} と J_{fl} と 3種類存在する。そこで、ロボットマニピュレータの慣性を表すことによって速度

ステップ応答試験を行うと求める慣性は J_{fl} だけにな

る。次に、 $\theta_2 = \theta_1 = \pi/2$ として同様の試験を行うと、 $J_{\text{fl}} + J_{\text{fl}}$ が求められる。 J_{fl} は既知であるから、 J_{fl} が求められる。最後に、 $\theta_1 = 0, \theta_2 = \pi/2$ として同様の試験を行うと、 $J_{\text{fl}} + J_{\text{fl}}$ を求めることができる。先ほどと同様に J_{fl} は既知であるため、 J_{fl} を求めることができる。

次に、本論文で行ったロ

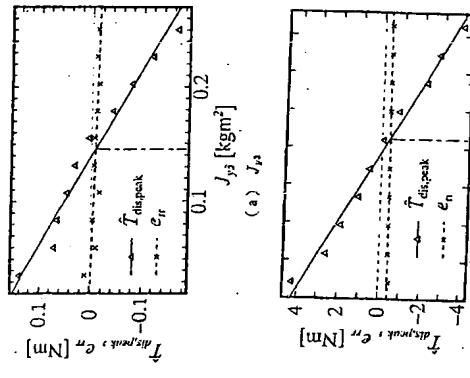


Fig. 6 Experimental results of inertia

6. ハイブリッド制御の実験結果

実験には、Fig. 4 (a) に示す垂直 3 脇脚 DD ボットマニピュレーターを用いた。実験のハードウェアシステムは Fig. 11 に示される。制御系は全て DSP (μPD77220) のソフトウェアフルゴリズムにより構成されている。先述のパラメータの同定試験でも同様のシステムを用いている。

Fig. 12 のように停止した燃費に対する位置と力のハイブリッド制御の結果を示す。燃費に用いた I^* 加速度コントローラの燃費関数 $S(s)$ と相間試験関数 $T(s)$ の周波数特性は Fig. 13 に示す。実験は x 方向に力制御、 y, z 方向に位置制御を行った。力指令 P^{ref} として 1 [Hz] の方形波を与え、位置指令 P^{ref} として y 方向にマニピュレーターの先端に設置された力センサと同様に、環境に加えられた力を求めることができる。

以上より求められた反力の推定値を、Fig. 4 で示される力センサからのフィードバック信号の代わりに用いることで、力センサを用いない位置と力のハイブリッド制御系を実現することができる。Fig. 10 にそのプロック図を示す。

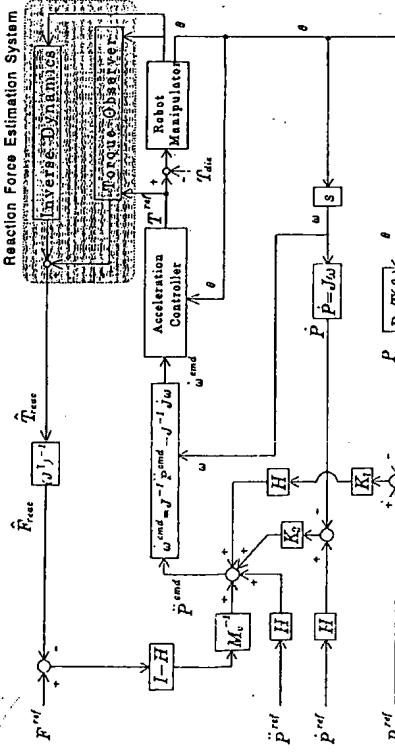


Fig. 10 Hybrid control system of position and force without force sensor

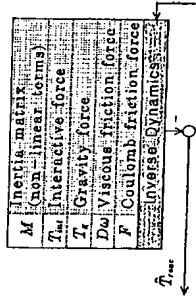
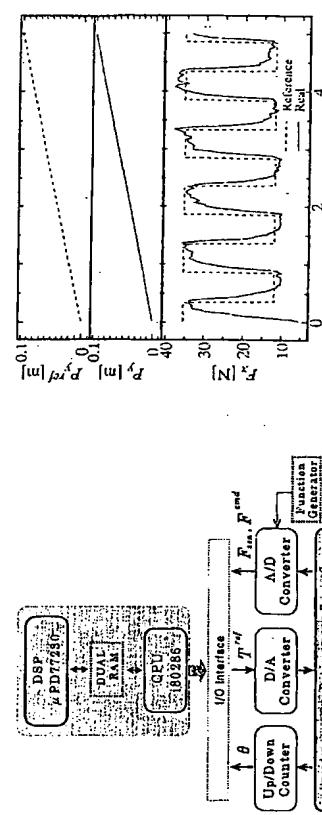
Fig. 7 Frequency characteristics of experimental H^* acceleration controller

Fig. 8 Experimental results of inertia

6. ハイブリッド制御の実験結果

実験には、Fig. 4 (a) に示す垂直 3 脇脚 DD ボットマニピュレーターを用いた。実験のハードウェアシステムは Fig. 11 に示される。制御系は全て DSP (μPD77220) のソフトウェアフルゴリズムにより構成されている。先述のパラメータの同定試験でも同様のシステムを用いている。

Fig. 12 のように停止した燃費に対する位置と力のハイブリッド制御の結果を示す。燃費に用いた I^* 加速度コントローラの燃費関数 $S(s)$ と相間試験関数 $T(s)$ の周波数特性は Fig. 13 に示す。実験は x 方向に力制御、 y, z 方向に位置制御を行った。力指令 P^{ref} として 1 [Hz] の方形波を与え、位置指令 P^{ref} として y 方向に

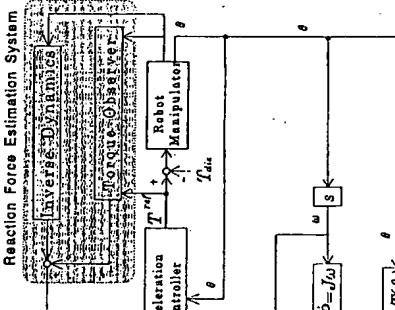


Fig. 9 Schematic diagram reaction force estimation system

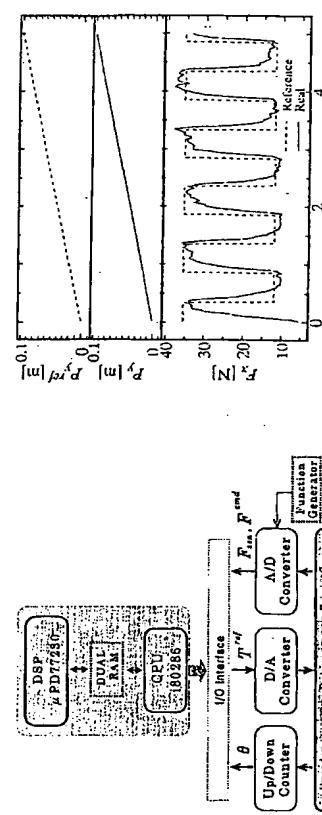


Fig. 11 Hardware system of tested DD robot manipulator

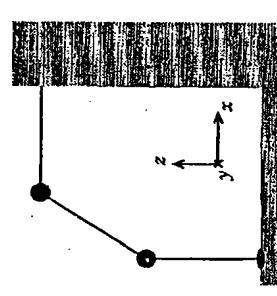
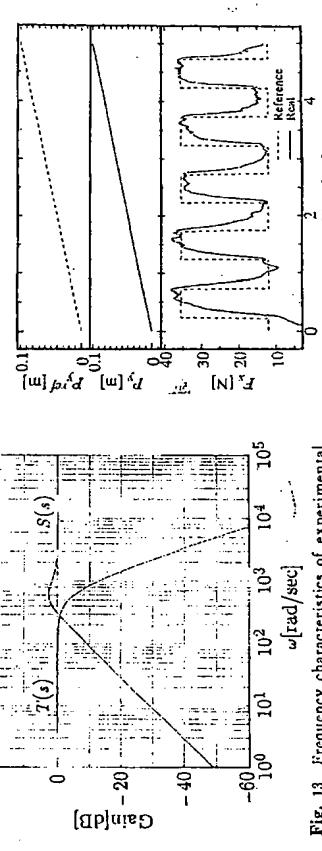


Fig. 12 Tested pose of robot manipulator

Fig. 13 Frequency characteristics of experimental H^* acceleration controllerFig. 14 (a) Without force sensor ($T_{int}=0$) of position and forceFig. 14 (b) With force sensor ($T_{int}=0$) of position and forceFig. 14 (c) Without force sensor ($T_{int}=0$) of position and force

